

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی مکانیک

بررسی عددی هیدرودینامیک جریان دوفاز گاز – ذره در رژیم انتقالی

رساله برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
در رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

نام دانشجو:

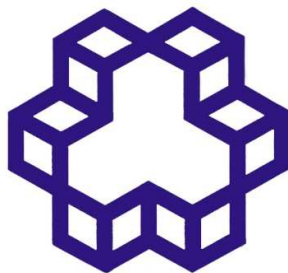
بهزاد مهاجر

استاد راهنما:

دکتر مهرزاد شمس

دکتر عبدالله شادآرام

شهریورماه ۱۳۹۰



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی مکانیک

بررسی عددی هیدرودینامیک جریان دوفاز گاز – ذره در رژیم انتقالی

رساله برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
در رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

نام دانشجو

بهزاد مهاجر

استاد راهنما:

دکتر مهرزاد شمس

دکتر عبدالله شادآرام

شهریورماه ۱۳۹۰

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تأییدیه‌ی هیأت داوران جلسه‌ی دفاع از پایان‌نامه/رساله

نام دانشکده: مهندسی مکانیک

نام دانشجو: بهزاد مهاجر

عنوان پایان‌نامه یا رساله: بررسی عددی هیدرودینامیک جریان دوفاز گاز - ذره در رژیم انتقالی

تاریخ دفاع: ۹۰/۰۶/۲۸

رشته: مکانیک حرارت و سیالات

گرایش: تبدیل انرژی

| ردیف | سمت | نام و نام خانوادگی | مرتبه دانشگاهی | دانشگاه یا مؤسسه | امضا |
|------|------------------|----------------------------|----------------|-------------------------------|------|
| ۱ | استاد راهنما | دکتر مهرزاد شمس | دانشیار | دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی | |
| ۲ | استاد راهنما | دکتر عبدالله شادآرام | دانشیار | دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی | |
| ۵ | استاد مدعو خارجی | دکتر سید مصطفی حسینعلی‌پور | دانشیار | دانشگاه علم و صنعت ایران | |
| ۷ | استاد مدعو داخلی | دکتر محمدحسین حامدی | استاد | دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی | |

تاییدیه صحت و اصالت نتایج

باسمه تعالی

اینجانب بهزاد مهاجر به شماره دانشجویی ۸۷۰۲۸۸۴ دانشجوی رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی مقطع تحصیلی کارشناسی ارشد تأیید می‌نمایم که کلیه‌ی نتایج این پایان‌نامه/رساله حاصل کار اینجانب و بدون هرگونه دخل و تصرف است و موارد نسخه‌برداری‌شده از آثار دیگران را با ذکر کامل مشخصات منبع ذکر کرده‌ام. در صورت اثبات خلاف مندرجات فوق، به تشخیص دانشگاه مطابق با ضوابط و مقررات حاکم (قانون حمایت از حقوق مؤلفان و مصنفان و قانون ترجمه و تکثیر کتب و نشریات و آثار صوتی، ضوابط و مقررات آموزشی، پژوهشی و انضباطی ...) با اینجانب رفتار خواهد شد و حق هرگونه اعتراض در خصوص احقاق حقوق مکتسب و تشخیص و تعیین تخلف و مجازات را از خویش سلب می‌نمایم. در ضمن، مسؤلیت هرگونه پاسخگویی به اشخاص اعم از حقیقی و حقوقی و مراجع ذی‌صلاح (اعم از اداری و قضایی) به عهده‌ی اینجانب خواهد بود و دانشگاه هیچ‌گونه مسؤلیتی در این خصوص نخواهد داشت.

نام و نام خانوادگی: بهزاد مهاجر

امضا و تاریخ:

مجوز بهره‌برداری از پایان‌نامه

بهره‌برداری از این پایان‌نامه در چهارچوب مقررات کتابخانه و با توجه به محدودیتی که توسط استاد راهنما به شرح زیر تعیین می‌شود، بلامانع است:

بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله برای همگان بلامانع است.

بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله با اخذ مجوز از استاد راهنما، بلامانع است.

بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله تا تاریخ ممنوع است.

نام استاد یا اساتید راهنما: دکتر مهرزاد شمس و عبدالله شادآرام

تاریخ:

امضا:

تقدیم به مادر مهربانم که هر چه دارم و هستم از محبت‌ها و گذشت‌های بی‌دریغ اوست.

تشکر و قدردانی:

در این مجال بر خود لازم می‌دانم که از استاد عزیزم آقای دکتر مهرزاد شمس بخاطر حمایت‌ها و راهنمایی‌ها -
هایشان قدردانی کنم.

چکیده

با جریان‌های گازی رقیق شده معمولاً در جریان داخل هندسه‌های کوچک نظیر MEMS و در کاربردهای فشار پائین نظیر وسایل در حال پرواز در ارتفاعات بالا و یا در حال کار کردن در خلأهای زیاد مواجه می‌شویم. این جریان‌ها با توجه به میزان رقیق‌شدگیشان به رژیم‌های جریان متفاوتی تقسیم می‌شوند. در جریان گازهای رقیق دو رژیم لغزشی و انتقالی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند. در رژیم لغزشی برهمکنش مولکولی در نزدیکی سطح اثرات خود را نشان می‌دهد که با اعمال شرایط مرزی لغزشی در معادلات ناویر-استوکس قابل حل می‌باشند؛ اما در رژیم جریان انتقالی اثرات زیاد برهمکنش مولکولی در کل جریان موجب از اعتبار انداختن معادلات ناویر-استوکس می‌شود. لذا برای حل جریان در این رژیم باید از روش‌های مولکولی استفاده شود. در پایان نامه حاضر به تحلیل جریان بر روی کره سه‌بعدی در رژیم‌های لغزشی و انتقالی پرداخته‌ایم.

در بخش اول به جهت درک هر چه بهتر تاثیرات وابستگی دمایی خواص سیال و طول مشخصه جریان بر روی هیدرودینامیک، جریان حول یک میکرو کره سه‌بعدی و غیر مقید در رژیم لغزشی شبیه‌سازی شده است. شروط مرزی لغزشی اعم از سرعت لغزشی و پرش دمایی به صورت عددی در معادلات ناویر-استوکس اعمال شده و خواص سیال از قبیل چگالی، ویسکوزیته، ضریب هدایت رسانایی و طول پویش آزاد مولکولی با دما متغیر در نظر گرفته شده است. اثرات خواص متغیر و تغییرات عدد نیودسن بر روی مومنوم جریان مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که در جریانات میکرو با نرخ انتقال حرارت بالا فرض خواص ثابت، فرضی خام و ابتدایی می‌باشد. همچنین در اختلاف دماهای بالاتر بین سطح و سیال، به دلیل افزایش ویسکوزیته، نتایج ضریب درگ بیشتری را نشان می‌دهند. لذا فرض خواص ثابت منجر به تخمین پایین‌تری از ضریب درگ می‌شود. این تفاوت در ضریب درگ به علت اختلاف دما، در رینولدزهای کم که اهمیت خاصی در جریان‌های دوفاز گاز-جامد در ابعاد میکرو دارد، مشهودتر می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عدد رینولدز، وابستگی ضریب درگ به عدد نیودسن کاهش می‌یابد.

در بخش دوم رژیم جریان سه‌بعدی انتقالی ماورای صوت روی یک کره با استفاده از روش DSMC مورد مطالعه قرار گرفته است. از کد dsmcFoam به عنوان حلگر مسئله استفاده شده، مدل کره سخت متغیر برای برخورد بین مولکولی و مدل دیواره پخشی برای برخورد مولکول با سطح در نظر گرفته شده‌اند. بررسی

گسترده و جامعی روی پارامترهای موثر بر هیدرودینامیک جریان در رژیم انتقالی صورت گرفته است. به عنوان مثال مشاهده شد که با افزایش عدد نیودسن ضریب درگ افزایش می‌یابد و با افزایش عدد ماخ ضریب درگ کاهش می‌یابد. در قسمت پایانی این تحقیق به بررسی تاثیر ارتفاع پرواز بر پارامترهای هیدرودینامیکی پرداخته‌ایم تا تاثیر همزمان تغییرات عدد ماخ و نیودسن را در نظر بگیریم. نتایج نشان می‌دهد که در طی مسیر فرود وسایل پروازی ماورای صوت ضریب درگ کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی: دینامیک گاز رقیق، خواص متغیر، رژیم لغزشی، رژیم انتقالی، شبیه‌سازی مستقیم مونت

کارلو

فهرست مطالب

| | |
|----|---|
| ۱ | فصل ۱ مقدمه‌ای بر جریان‌های ناپیوسته |
| ۲ | ۱-۱ مقدمه |
| ۳ | ۲-۱ شبیه‌سازی جریان‌های ناپیوسته |
| ۷ | ۳-۱ معرفی کلی پایان‌نامه و نوآوری‌ها |
| ۹ | فصل ۲ جریان دو فاز گاز- جامد در رژیم‌های رقیق لغزشی |
| ۱۰ | ۱-۲ مقدمه |
| ۱۰ | ۲-۲ مروری بر کارهای صورت گرفته |
| ۱۶ | ۲-۳ معادلات حاکم بر جریان لغزشی پیرامون ابروسول کروی |
| ۱۸ | ۴-۲ شرط مرزی لغزشی بر سطح ذره |
| ۲۰ | ۵-۲ نقش ضرایب تطابق |
| ۲۱ | ۶-۲ ارتباط اعداد بی بعد رینولدز، نیودسن و ماخ |
| ۲۲ | ۷-۲ خواص متغیر یا ثابت؟ |
| ۲۳ | ۸-۲ بررسی تئوری اثرات کوچک شدن از ابعاد ماکرو به میکرو |
| ۲۵ | ۱-۸-۲ کدام خواص را متغیر و کدام خواص را ثابت فرض کنیم؟ |
| ۲۷ | ۹-۲ شبیه‌سازی عددی جریان |
| ۲۷ | ۱-۹-۲ دامنه محاسباتی و اعمال شروط مرزی |
| ۳۱ | ۱۰-۲ فرایند حل عددی |
| ۳۳ | فصل ۳ شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو |
| ۳۴ | ۱-۳ مقدمه |
| ۳۵ | ۲-۳ تاریخچه مدل‌سازی جریان‌های رقیق ماورای صوت |
| ۳۵ | ۱-۲-۳ آیرودینامیک فضاپیما |
| ۳۸ | ۲-۲-۳ جریان حول اجسام باریک و محدب |
| ۳۹ | ۳-۳ مقدمه‌ای بر دینامیک گاز مولکولی |
| ۴۱ | ۴-۳ شبیه‌سازی دینامیک گاز مولکولی |
| ۴۲ | ۵-۳ معادله بولتزمن |
| ۴۴ | ۶-۳ روش‌های شبیه‌سازی عددی |
| ۴۵ | ۱-۶-۳ روش‌های پیوسته مینا |
| ۴۶ | ۲-۶-۳ روش‌های ذره مینا |
| ۴۷ | ۷-۳ تاریخچه روش DSMC |
| ۴۹ | ۸-۳ مروری بر خواص میکروسکوپی و روابط حاکم در جریان‌های رقیق |
| ۴۹ | ۱-۸-۳ گاز رقیق ساده |

| | |
|----|---|
| ۵۶ | ۲-۸-۳ برخورد الاستیک دوتایی |
| ۵۷ | ۳-۸-۳ مدل‌های برخورد مولکولی |
| ۵۷ | ۱-۳-۸-۳ مدل کره سخت |
| ۵۸ | ۲-۳-۸-۳ مدل کره سخت متغیر |
| ۵۸ | ۳-۳-۸-۳ مدل نمایی معکوس |
| ۵۹ | ۴-۳-۸-۳ مدل کره نرم متغیر (VSS) |
| ۶۰ | ۴-۸-۳ برخورد گاز با سطح جامد |
| ۶۰ | ۱-۴-۸-۳ برخورد آینه‌ای |
| ۶۱ | ۲-۴-۸-۳ برخورد پخشی |
| ۶۱ | ۹-۳ شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو |
| ۶۲ | ۱۰-۳ مراحل مختلف روش شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو (DSMC) |
| ۶۲ | ۱-۱۰-۳ گسسته‌سازی ناحیه حل |
| ۶۳ | ۲-۱۰-۳ شروع حل |
| ۶۴ | ۳-۱۰-۳ تعیین قدم زمانی |
| ۶۴ | ۴-۱۰-۳ تعیین موقعیت مولکول نمونه |
| ۶۵ | ۵-۱۰-۳ تعیین مولفه‌های سرعت مولکول نمونه |
| ۶۵ | ۶-۱۰-۳ حرکت مولکول‌ها در سلول |
| ۶۵ | ۷-۱۰-۳ برخورد مولکول‌ها به سطح |
| ۶۶ | ۸-۱۰-۳ احتمال برخورد مولکول‌ها در یک سلول |
| ۶۷ | ۹-۱۰-۳ مولفه‌های سرعت دو مولکول پس از برخورد |
| ۶۸ | ۱۰-۱۰-۳ شاخص‌گذاری مولکول‌ها |
| ۶۹ | ۱۱-۱۰-۳ نمونه‌گیری خواص ماکروسکوپی |
| ۷۰ | ۱۱-۳ شرایط مرزی |
| ۷۰ | ۱-۱۱-۳ شرایط مرزی ماورای صوت |
| ۷۱ | ۲-۱۱-۳ شرط مرزی مادون صوت |
| ۷۸ | ۳-۱۱-۳ شرط مرزی خلا |
| ۷۸ | ۴-۱۱-۳ شرایط مرزی دیوار متحرک |
| ۷۹ | ۱۲-۳ تعداد ذرات شبیه‌سازی |
| ۸۰ | ۱۳-۳ محدودیت‌های روش شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو |
| ۸۲ | ۱۴-۳ خطای محاسباتی در روش شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو |
| ۸۲ | ۱-۱۴-۳ خطاهای آماری |
| ۸۳ | ۲-۱۴-۳ خطای عددی |
| ۸۳ | ۳-۱۴-۳ خطای قطع |
| ۸۴ | فصل ۴ بحث و بررسی نتایج |

| | |
|-----|---|
| ۸۵ | ۱-۴ جریان حول کره در رژیم لغزشی |
| ۸۵ | ۱-۱-۴ راستی آزمایی روش حل |
| ۸۷ | ۲-۱-۴ بحث و بررسی نتایج |
| ۹۵ | ۳-۱-۴ نتیجه گیری |
| ۹۷ | ۲-۴ جریان حول کره در رژیم انتقالی |
| ۹۸ | ۱-۲-۴ راستی آزمایی روش حل با استفاده از جریان مافوق صوت دو بعدی بر روی صفحه تخت |
| ۱۰۳ | ۲-۲-۴ راستی آزمایی روش حل با استفاده از جریان ماورای صوت دو بعدی بر روی سیلندر |
| ۱۰۶ | ۳-۲-۴ راستی آزمایی روش حل برای جریان ماورای صوت سه بعدی بر روی کره |
| ۱۰۸ | ۴-۲-۴ بحث و بررسی نتایج |
| ۱۰۸ | ۱-۴-۲-۴ بررسی تاثیرات عدد ماخ |
| ۱۱۶ | ۲-۴-۲-۴ بررسی تاثیرات عدد نیودسن |
| ۱۲۳ | ۳-۴-۲-۴ بررسی تاثیر ارتفاع پرواز |
| ۱۲۹ | ضمایم |
| ۱۳۲ | ضمیمه الف اعمال شرایط مرزی در رژیم لغزشی |
| ۱۳۲ | أ. شرط مرزی سرعت لغزشی |
| ۱۳۴ | ب. شرط مرزی پخش دمایی |
| ۱۳۵ | ضمیمه ب معرفی کد FOAM |
| ۱۳۵ | أ. مقدمه |
| ۱۳۵ | ب. ساختار کد dsmcFOAM |
| ۱۳۷ | ج. ساختار داده ها در OpenFOAM و الگوریتم های اسای کد dsmcFoam |
| ۱۴۰ | د. الگوریتم پر کردن اولیه میدان حل با ذرات |
| ۱۴۲ | ه. الگوریتم توزیع ذرات در سطوح مرزهای ورودی |
| ۱۴۲ | و. الگوریتم ردیابی ذرات در شبکه های سه بعدی نامنظم با هندسه ی دلخواه |
| ۱۴۳ | ز. الگوریتم اولیه ی ردیابی ذره در اپن فوم |
| ۱۴۵ | ح. الگوریتم ردیابی اصلاح شده |
| ۱۴۶ | ط. الگوریتم ردیابی ذره و شرایط مرزی |
| ۱۴۷ | مراجع |

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) مدل‌های پیوسته و مولکولی برای مدل‌سازی جریان سیال ۵
- شکل (۲-۱) رژیم‌های عدد نیودسن و محدودیت‌های آن بر مدل‌سازی گاز. ۷
- شکل (۱-۲ الف) تقسیم حوزه محاسباتی پیرامون ذره کروی جهت مدل‌سازی بهتر پرش سرعت روی سطح کره. ۲۷
- شکل (۱-۲ ب) الگوی شبکه محاسباتی پیرامون ذره، نمای صفحه Z-Y، بزرگنمایی هندسه شبکه نزدیک ذره. ۲۸
- شکل (۱-۲ ج) الگوی شبکه محاسباتی پیرامون ذره، نمای صفحه X-Y، بزرگنمایی هندسه شبکه روی سطح ذره. ۲۸
- شکل (۲-۲) شماتیکی از شروط مرزی اتخاذ شده در فرایند حل عددی ۳۱
- شکل (۱-۳) برخورد بین دو مولکول کره سخت با قطر d ۵۲
- شکل (۲-۳) شماتیک میدان نیرویی بین دو مولکول ۵۳
- شکل (۳-۳) حجم موثر جاروب شده توسط حرکت مولکول نمونه در میان مولکول‌های ساکن ۵۴
- شکل (۴-۳) برخورد مولکول با سطح جامد؛ الف) برخورد آینه‌ای ب) برخورد پخشی ۶۰
- شکل (۵-۳) شماتیک شبکه محاسباتی ۶۳
- شکل (۶-۳) خطوط خط چین بیان‌کننده مقدار $F_{NUM} = 10^{19}$ ، خطوط به همراه دایره $F_{NUM} = 10^{18}$ ، نقطه -خط چین $F_{NUM} = 10^{17}$ و خط توپر $F_{NUM} = 10^{16}$ است [۱۱۴]. ۸۰
- شکل (۱-۴) مقایسه راه حل عددی با نتایج تجربی، هر دو در رژیم پیوسته ۸۶
- شکل (۲-۴) مقایسه مدل‌سازی عددی لغزشی در $Kn=0/01$ با نتایج تجربی در رژیم پیوسته ۸۶
- شکل (۳-۴) حالات غیرقابل تراکم مورد مطالعه در کار حاضر شامل ۵۸ نقطه در رژیم جریان لغزشی ۸۷
- شکل (۴-۴) تغییرات چگالی در میدان حل $Re = 0/25$ ، $Kn = 0/05$ ، $\Delta T = 600 K$ ۸۸
- شکل (۵-۴) تغییرات ویسکوزیته در میدان حل $Re = 0/25$ ، $Kn = 0/05$ ، $\Delta T = 600 K$ ۸۹
- شکل (۶-۴) تغییرات پویس آزاد مولکولی در میدان حل $Re = 0/25$ ، $Kn = 0/05$ ، $\Delta T = 600 K$ ۸۹
- شکل (۷-۴) دمای کل در میدان حل $Re = 0/25$ ، $Kn = 0/05$ ، $\Delta T = 600 K$ (الف) خواص متغییر، (ب) خواص ثابت ۹۰
- شکل (۸-۴) مقایسه ضریب درگ کلی محاسبه شده با استفاده از خواص ثابت و خواص متغییر: (الف) $\Delta T = 200 K$ ، (ب) $\Delta T = 400 K$ و (ج) $\Delta T = 600 K$ ۹۲
- شکل (۹-۴) مقایسه ضریب درگ کلی محاسبه شده با خواص متغییر در اختلاف دماهای مختلف، $Re = 0/25$ ۹۲
- شکل (۱۰-۴) مقایسه ضریب درگ کلی محاسبه شده با خواص متغییر در اختلاف دماهای مختلف، (الف) $Kn = 0/01$ ، (ب) $Kn = 0/05$ ، (ج) $Kn = 0/1$ ۹۳
- شکل (۱۱-۴) مقایسه ضریب درگ کلی محاسبه شده با خواص متغییر در رینولدزهای مختلف، (الف) $Kn = 0/01$ ، (ب) $Kn = 0/05$ ، (ج) $Kn = 0/1$ ۹۴
- شکل (۱۲-۴) مقایسه ضریب درگ کلی محاسبه شده با خواص متغییر در رینولدزهای مختلف، $\Delta T = 200$ ۹۵
- شکل (۱۳-۴) تعداد ذرات شبیه‌سازی شده در هر گام زمانی ۹۹
- شکل (۱۴-۴) کانتور عدد ماخ، ماخ ورودی ۴، عدد نیودسن $0/0143$ [۱۵] ۱۰۰
- شکل (۱۵-۴) ضریب اصطکاک محلی، ماخ ورودی ۴، عدد نیودسن $0/0143$ ۱۰۱
- شکل (۱۶-۴) ضریب انتقال حرارت محلی، ماخ ورودی ۴، عدد نیودسن $0/0143$ ۱۰۱
- شکل (۱۷-۴) سرعت لغزشی، ماخ ورودی ۴، عدد نیودسن $0/0143$ ۱۰۲
- شکل (۱۸-۴) پرش دمایی، ماخ ورودی ۴، عدد نیودسن $0/0143$ ۱۰۲

- شکل (۱۹-۴) شبکه محاسباتی حول استوانه ۱۰۳
- شکل (۲۰-۴) کانتور عدد ماخ، ماخ ورودی ۱۰ و عدد نیودسن 0.1 (الف) dsmcFoam، (ب) Bird [۱۱۷] ۱۰۴
- شکل (۲۱-۴) نرخ انتقال حرارت از سطح استوانه، ماخ ورودی ۱۰ و عدد نیودسن 0.1 (الف) dsmcFoam، (ب) Bird [۱۱۵] ۱۰۵
- شکل (۲۲-۴) شبکه محاسباتی جریان حول کره ۱۰۷
- شکل (۲۳-۴) کانتورهای الف (چگالی عددی، ب) دما، ج) سرعت حول کره، ماخ ورودی ۶ و عدد نیودسن 0.34 ۱۰۸
- شکل (۲۴-۴) چگالی بر روی خط سکون، عدد نیودسن ۱ ۱۰۹
- شکل (۲۵-۴) سرعت بر روی خط سکون، عدد نیودسن ۱ ۱۱۰
- شکل (۲۶-۴) فشار بر روی خط سکون، عدد نیودسن ۱ ۱۱۱
- شکل (۲۷-۴) پروفیل سرعت، عدد نیودسن ۱ ۱۱۲
- شکل (۲۸-۴) پروفیل فشار، عدد نیودسن ۱ ۱۱۳
- شکل (۲۹-۴) کانتور فشار، عدد نیودسن ۱، الف) $Ma = 3$ ، ب) $Ma = 12$ ۱۱۳
- شکل (۳۰-۴) پروفیل سرعت بر روی سطح کره، عدد نیودسن ۱ ۱۱۴
- شکل (۳۱-۴) پروفیل فشار بر روی سطح کره، عدد نیودسن ۱ ۱۱۴
- شکل (۳۲-۴) ضریب درگ بر حسب عدد ماخ، عدد نیودسن ۱ ۱۱۵
- شکل (۱-۱) کانتور سرعت حول کره، عدد نیودسن ۱، الف) $Ma = 3$ ، ب) $Ma = 7$ ، $Ma = 10$ ، $Ma = 12$ ، $Ma = 15$ ۱۱۴
- شکل (۳۴-۴) چگالی بر روی خط سکون، عدد ماخ ۱۰ ۱۱۷
- شکل (۳۵-۴) سرعت بر روی خط سکون، عدد ماخ ۱۰ ۱۱۸
- شکل (۳۶-۴) فشار بر روی خط سکون، عدد ماخ ۱۰ ۱۱۸
- شکل (۳۷-۴) پروفیل سرعت برای اعداد نیودسن مختلف، عدد ماخ ۱۰ ۱۱۹
- شکل (۳۸-۴) پروفیل فشار برای اعداد نیودسن مختلف، عدد ماخ ۱۰ ۱۲۰
- شکل (۳۹-۴) پروفیل سرعت بر سطح کره، عدد ماخ ۱۰ ۱۲۰
- شکل (۴۰-۴) پروفیل فشار بر سطح کره، عدد ماخ ۱۰، الف) $Kn = 0.1$ ، ب) $Kn = 1$ ۱۲۱
- شکل (۴۱-۴) ضریب درگ بر حسب عدد نیودسن، عدد ماخ ۱۰ ۱۲۱
- شکل (۴۲-۴) کانتور سرعت حول کره، عدد ماخ ۱۰، الف) $Kn = 0.1$ ، ب) $Kn = 1$ ، $Kn = 3$ ، $Kn = 5$ ، $Kn = 10$ ۱۲۲
- شکل (۴۳-۴) تغییرات عدد ماخ بر حسب ارتفاع پرواز ۱۲۴
- شکل (۴۴-۴) تغییرات عدد نیودسن بر حسب ارتفاع پرواز ۱۲۴
- شکل (۴۵-۴) تغییرات چگالی بر روی خط سکون ۱۲۵
- شکل (۴۶-۴) پروفیل سرعت بر روی خط سکون ۱۲۶
- شکل (۴۷-۴) پروفیل فشار بر روی خط سکون ۱۲۶
- شکل (۴۸-۴) پروفیل سرعت در ارتفاعات مختلف ۱۲۷
- شکل (۵۰-۴) تغییرات ضریب درگ بر حسب ارتفاع پرواز ۱۲۸
- شکل (۵۱-۴) کانتور سرعت حول کره، الف) $H = 95$ ، ب) $H = 100$ ، ج) $H = 104$ ، د) $H = 107$ ، ه) $H = 110$ ۱۲۹
- $H = 125$ (و) ۱۲۹
- شکل (الف-۱) اعمال شرایط مرزی لغزش ۱۳۳
- شکل (ب-۱) دایرکتوری کد dsmcFoam [۱۲۵] ۱۳۷

شکل (ب-۲) مقایسه شماتیک کلاس parcel (تک ذره پایین) و کلاس cloud (مجموعه ذرات بالا به علاوه شبکه

عددی) ۱۳۸

شکل (ب-۳) ساختار یک چهاروجهی با اضلاع مثلثی (سمت چپ) و نما از بالای آن (سمت راست) ۱۴۱

شکل (ب-۴) یک ذره که از نقطه A به نقطه B حرکت می کند و دو وجه را در نقاط P و P' قطع می کند و دو بار سلول

آن عوض می شود ۱۴۳

شکل (ب-۵) توصیف فیزیکی λ_a ، وجه neg مقدار منفی برای λ_a و وجه pos مقداری بزرگتر از ۱ برای λ_a بدست

می دهند ۱۴۴

فهرست جداول

| | |
|-----|--|
| ۱۲ | جدول (۱-۲) فاکتورهای تصحیح لغزش برای هوا با پویش آزاد میانگین ۶۷/۳ نانومتر در فشار ۱۰۱/۳ کیلوپاسکال و دمای ۲۳ درجه سانتیگراد |
| ۲۵ | جدول (۲-۲) حساسیت خواص آب و هوا نسبت به دما |
| ۲۵ | جدول (۳-۲) حساسیت خواص آب و هوا نسبت به فشار |
| ۳۰ | جدول (۴-۲) نتایج بررسی حل مستقل از شبکه در $Kn = 0.05$ و $Re = 1$ |
| ۵۰ | جدول (۱-۳) تاریخچه توسعه DSMC |
| ۱۰۶ | جدول (۱-۴) مشخصات جریان عبوری از روی کره |
| ۱۲۳ | جدول (۲-۴) مشخصات هوا در ارتفاعات [۹۲] |

فصل ۱

مقدمه‌ای بر جریان‌های ناپیوسته

با جریان‌های گازی رقیق شده معمولاً در جریان داخل هندسه‌های کوچک نظیر MEMS و در کاربردهای فشار پائین نظیر وسایل در حال پرواز در ارتفاعات بالا و یا در حال کار کردن در خلأهای زیاد مواجه می‌شویم. آزمایشات اولیه در دینامیک گاز رقیق توسط نیودسن در سال ۱۹۱۱ [۱] صورت گرفت.

اساساً دو روش برای مدل سازی میدان جریان وجود دارد:

(۱) در نظر گرفتن سیال به عنوان مجموعه‌ای از مولکول‌ها که به واقعیت بسیار نزدیک است.

(۲) در نظر گرفتن سیال به عنوان یک محیط پیوسته.

گرایش اول به دو دسته روش‌های قطعی^۱ و احتمالی^۲ تقسیم می‌شود. در گرایش دوم، سرعت، چگالی، فشار و غیره در هر نقطه از فضا و زمان تعریف می‌گردند و بقای جرم، مومنتوم و انرژی منجر به مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیلی جزئی غیر خطی (اویلر، ناویر-استوکس، برنت و...) می‌گردد.

برای جریان گاز رقیق نزدیک تعادل، معادلات ناویر-استوکس قابل استخراج از معادلات مولکولی بولتزمان هستند و بصورت مستقل نیز برای مایعات و گازها قابل استخراج می‌باشند. در حالت استخراج مستقل، تعدادی از قواعد تجربی^۳ مورد نیاز است تا مجموعه معادلات بسته شود. مدل‌های عددی جهت شبیه‌سازی جریان‌های پیوسته از نظر محاسباتی و ریاضیاتی نسبت به آنچه که در مدل‌های پیچیده مولکولی دیده می‌شود به آسانی قابل اجرا می‌باشد. اساساً مدل پیوسته منجر به پیش بینی‌های نسبتاً دقیق می‌گردد؛ البته با این شرط که خواصی نظیر چگالی و سرعت توسط متوسط‌گیری روی المان‌های به اندازه کافی بزرگ سیال در مقایسه با ساختار میکروسکوپی سیال و به اندازه کافی کوچک نسبت به پدیده‌های ماکروسکوپی سیال قابل تعریف باشد. بدین ترتیب امکان استفاده از حساب دیفرانسیل برای تشریح آن فراهم می‌گردد. شرط مهم دیگر این است که سیال نباید خیلی دور از شرایط تعادل ترمودینامیکی قرار داشته باشد. شرط اول تقریباً همیشه ارضا می‌گردد ولی شرط دوم معمولاً اعتبار معادلات پیوسته را محدود می‌نماید.

¹ Deterministic

² Probablistic

³ Contitutive laws

همان گونه که در بالا اشاره گردید، جهت بستن مجموعه معادلات بایستی تنش برشی و شار حرارتی به عنوان توابعی از کمیات ماکروسکوپیک نظیر سرعت، و دما بیان گردند. از قوانین تجربی مفید، فرض رابطه‌ی خطی بین تنش برشی و نرخ کرنش برشی می‌باشد، که فقط وقتی معتبر است که سیال در شرایط نزدیک به تعادل ترمودینامیکی قرار داشته باشد. علاوه بر آن، شرط مرزی سنتی عدم لغزش حتی قبل از آن که رابطه خطی مذکور صحت خود را از دست بدهد، غیر معتبر می‌شود. حالت مشابهی برای شرط عدم لغزش دما روی دیواره و صحت رابطه خطی بین شار حرارتی و گرادیان دما وجود دارد.

۲-۱ شبیه‌سازی جریان‌های ناپیوسته

وقتی که مسافت پویش آزاد میانگین گاز^۱ افزایش می‌یابد و یا طول مشخصه جریان سیال تا یک سایز قابل مقایسه با فواصل مولکولی کاهش می‌یابد اثرات رقت^۲ خودنمایی کرده و دبی جرمی سیال، پروفیل سرعت و دما، نرخ انتقال حرارت، تنش برشی سطحی و نیروهای هیدرودینامیکی تحت تأثیر قرار می‌گیرند. در چنین شرایطی فرض پیوستگی سیال برهم خورده و حضور تعادل ترمودینامیکی محلی سیال در معرض ابهام قرار می‌گیرد. عدد بی بعد نیودسن^۳ که معادل با نسبت دو مقیاس طولی از جریان گاز است جهت درجه بندی کمی میزان رقیق بودن گاز و در نتیجه تعیین انواع رژیم‌های مرتبط با آن به کار برده می‌شود. این عدد را بصورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$Kn = \frac{\lambda}{L} \quad (1-1)$$

که در آن λ که مسافت پویش آزاد میانگین گاز و L طول مشخصه جریان است. اسکاف و کمبری [۲] تقسیم‌بندی زیر را جهت تعیین انواع رژیم‌های گازی رقیق برحسب عدد نیودسن ارائه کردند. به ازای $0 < Kn < 0.1$ فرض پیوستگی گاز برقرار بوده و سیال در تعادل ترمودینامیکی محلی به سر می‌برد. قوانین بقای ناویر-استوکس به همراه شرط مرزی عدم لغزش روی دیواره‌ها توانایی توضیح تمامی رفتارهای گاز را داراست. وقتی که عدد نیودسن بین 0.1 و 1 قرار می‌گیرد اثرات رقت آغاز به تأثیر گذاری می‌نماید. این محدوده به رژیم جریان لغزشی معروف است. در این رژیم فرض پیوستگی گاز هنوز پابرجاست در حالیکه

¹ Gas mean free path

² Rarefaction effects

³ Knudsen